黄土高原小流域不同植物群落土壤生态化学计量的垂直变化特征

吴 丹[1]，温 晨[1]，卫 伟[2]，张钦弟[1*]
（1. 山西师范大学 生命科学学院，太原 030031；2. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室，北京 100085）

摘要：在黄土高原生态恢复重建过程中，土壤养分及化学计量特征是评价黄土区植被恢复效应的有效途径。该文以典型半干旱黄土小流域 3 种恢复方式下（天然荒草、自然恢复、人工恢复）的 5 种植物群落（长芒草群落、赖草群落、苜蓿群落、柠条群落、山杏群落）不同深度的土壤（0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm）为研究对象，利用方差分析及线性回归法分析土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）、全钾（TK）含量及化学计量比的垂直变化特征，并探讨各指标间的耦合关系。结果表明：（1）群落类型和土壤土层深度对土壤 SOC、TN、TP 均有显著影响，土层深度还显著影响土壤 TK 的分布，但两者交互作用只对 TN 含量有显著影响。0～20 cm 土层中，土壤 SOC、TN 含量表现为柠条灌丛显著高于长芒草、赖草、苜蓿和山杏群落（P<0.05）。（2）在土壤垂直剖面上，除 C:N 随土层加深而增加外，其他土壤化学计量比均随土层加深而逐渐降低。在 0～20 cm 和 20～40 cm 的土层中，土壤 C:N 表现为赖草群落显著高于长芒草、苜蓿、柠条和山杏群落（P<0.05），而土壤 C:P、N:P、N:K 均表现为人工恢复柠条群落最高；在 40～60 cm 的土层中，山杏土壤 C:K 显著低于长芒草、赖草、苜蓿和柠条群落（P<0.05）。（3）不同群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量彼此间呈正相关关系，其中，SOC 含量与 TN 含量、TN 含量与 TP 含量、SOC 含量与 TP 含量、TN 含量与 TK 含量在 5 种植物群落中均达到显著正相关（P<0.05）。土壤 C:P 与 C:K、C:K 与 N:K、N:P 与 N:K 间均具显著正相关关系（P<0.05），C:N 与 N:P、C:N 与 N:K、P:K 与 C:P、P:K 与 N:P 间均呈负相关关系。综合来看，不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量均随土层加深而逐渐降低，人工恢复柠条生态化学计量特征综合更强，更有利于改善当地土壤质量。

关键词：黄土小流域，植被恢复，土壤养分，垂直分布，生态化学计量
中图分类号：Q948.113　　　　**文献标识码：**A

Vertical variation characteristics of soil ecological stoichiometry of different communities in small watershed on the Loess Plateau

WU Dan[1], WEN Chen[1], WEI Wei[2], ZHANG Qindi[1*]
(1. *College of Life Sciences, Shanxi Normal University*, Taiyuan 030031, China;
2. *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100085, China)

Abstract: Soil nutrients and their stoichiometric characteristics are effective ways to evaluate the

---

基金项目：山西省回国留学人员科研资助项目（2021-097）；山西省基础研究计划（20210302123333）；国家自然科学基金（41971129）[Supported by Shanxi Scholarship Council of China (2021-097); Basic Research Programs of Shanxi Province (20210302123333) ; National Natural Science Foundation of China (41971129)]。
第一作者：吴丹（1997-），硕士研究生，主要研究方向为植被生态学，(E-mail)wudan0207@126.com。
[*]**通信作者：**张钦弟，博士，副教授，主要研究方向为群落生态和生态水文，(E-mail)nyzqd@126.com。

effect of vegetation restoration in small watersheds on the Loess Plateau. The study aims to analyze different soil depths（0−20 cm、20−40 cm、40−60 cm）of *Stipa bungeana* community, *Leymus secalinus* community, *Medicago sativa* community, *Caragana korshinskii* community, and *Armeniaca sibirica* community. The vertical variation characteristics of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK) contents. Their ecological stoichiometry was analyzed utilizing variance analysis and linear regression, and the coupling relationship among each index was discussed. The results were as follows: (1) Soil SOC, TN, TP were affected by different communities, and soil depth affected soil SOC, TN, TP and TK, but only TN content was affected by their interaction. In the 0−20 cm soil layer, soil SOC and TN contents in *Caragana korshinskii* shrub were significantly higher than those in other communities ($P<0.05$). (2) In the vertical soil profile, except for C:N, the soil stoichiometric ratios decreased gradually with soil depth deepening. In the soil layers of 0−20 cm and 20−40 cm, except for the soil C:N which was the highest in *Leymus secalinus* community ($P<0.05$), the soil C:P, N:P and N:K were all the highest in *Caragana korshinskii* community; In the 40−60 cm soil layer, the soil C:K of the *Armeniaca sibirica* community was significantly lower than other communities ($P<0.05$). (3) The contents of soil SOC, TN, TP and TK were positively correlated under different communities. Among them, SOC and TN contents, TN and TP contents, SOC and TP contents, TN and TK contents reached significant levels in the five communities ($P<0.05$). In different communities, there was a significant positive correlation between soil C:P and C:K, C:K and N:K, N:P and N:K ($P<0.05$), while there was a negative correlation between C:N and N:P, C:N and N:K, P:K and C:P, P:K and N:P. To sum up, the contents of SOC, TN, TP and TK in the soil in different communities gradually decrease with the soil depth deepening. The comprehensive ecological stoichiometry characteristics of the *Caragana korshinskii* community are more substantial, more conducive to improving the local soil quality.

Key words: loess watershed, vegetation restoration, soil nutrient, vertical distribution, ecological stoichiometry

土壤是陆地生态系统的主要组成部分，同时也是植物生长发育所需养分的重要来源，影响着植物群落的组成、稳定及演替（Zeng et al., 2017）。碳（C）、氮（N）、磷（P）、钾（K）元素是土壤中的关键营养元素，影响着植物生长，凋落物分解及土壤养分积累与循环（Griffiths et al., 2012）。此外，土壤营养元素的动态和演变在生态过程中是相互作用和耦合的（Tian et al., 2010；陶冶等，2016），元素间的比例关系是反映生态系统结构和功能的重要指标（Liu et al., 2017）。生态化学计量学是研究生态系统中营养元素的分布、循环、限制和平衡的重要方法（Elser et al., 2000；贺金生等，2010；Fang et al., 2017），采用其原理与手段研究土壤特征，可为评价土壤质量、阐明养分有效性提供建设性依据，对揭示陆地生态系统中土壤营养元素的循环和平衡机制具重要意义。

近年来，陆地生态系统中关于不同植物群落和不同恢复方式下 C、N、P、K 的生物地球化学循环和生态化学计量特征的研究受到广泛关注（Chen et al., 2012；Wang et al., 2014）。周萍等（2008）研究发现植物群落组成影响土壤养分和有机质含量及分布，不同群落的根系深浅不同，对土壤养分的吸收强度和深度有所不同。植物类型对不同元素的选择吸收也不同，从而导致不同群落的土壤养分在垂直剖面上存在差异（朱秋莲等，2013）。薛箑等（2007）研究发现黄土丘陵区纸坊沟流域人工柠条林和刺槐林土壤 C 含量和 N 含量高于天然草地，人工乔灌木林对土壤的改善作用优于天然草地。另一些研究则认为，虽然人工恢复植被在一定范围内能改善土壤质量，但其改善作用比天然植被弱。王国梁等（2002）研究发现人工种植的乔灌木林对 0～40 cm 土壤养分的提高作用小于自然恢复草本植物；赵元等（2021）研究认为桂西北喀斯特峰丛洼地自然恢复比人工恢复更有利于提升土壤活性碳组分。有研究表

明土壤养分 N 随土层深度而变化，一方面可能是由于植物的根系活动随土层深度变化，另一方面与土壤发育有关（邓小军等，2014）。王凯博等（2012）研究发现天然灌木林、天然草地和人工灌木林土壤有机质和全氮垂直变化较大，而人工乔木林变化较小。有研究表明 K 元素是仅次于 N、P 元素的第三大植物生产元素，K 元素与其他元素之间的比率变化主要依赖于环境条件（Sardans & Penuelas, 2014）。李培玺等（2020）研究发现巢湖湖滨带土壤 C、N、P 生态化学计量特征受植被类型影响显著。以上研究都表明，通过比较不同植物群落和不同恢复方式下土壤化学计量特征的差异，对揭示生态系统稳定性、生产力及植被恢复效果等有重要意义。

黄土高原地处半干旱半湿润气候区，生态环境脆弱，水土流失严重，植被恢复重建是改善该地区土壤质量和保持水土的主要措施之一（An et al., 2013）。生态建设的成效在很大程度上取决于土壤养分的变化，养分含量可以表征植被恢复对土壤质量的改善作用，土壤质量逐步提高并保持较高水平，退化的生态系统才能得到恢复（安韶山等，2008）。经过以自然恢复和人工恢复为主的大规模退耕还林、还草的生态恢复和环境重建工作，该区植被恢复类型丰富多样，植被覆盖率有所提高，形成了不同的植物群落类型，生态环境有了很大改善（Xin et al., 2012）。近年来，大量研究对黄土高原植被恢复过程中土壤养分变化（闫玉厚和曹炜，2010）、土壤碳氮储量与分布（Chen et al., 2017）、土壤理化性质（Wei et al., 2018）等方面进行探讨，但不同群落和不同恢复方式下土壤生态化学计量垂直变化特征的研究还比较缺乏。因此，我们前期对典型半干旱黄土小流域 3 种植被恢复方式下（天然荒草、自然恢复、人工恢复）的 5 种植物群落[长芒草（*Stipa bungeana*）、赖草（*Leymus secalinus*）、苜蓿（*Medicago sativa*）、柠条（*Caragana korshinskii*）、山杏（*Armeniaca sibirica*）]的根、茎、叶及土壤碳(C) 、氮(N) 、磷(P) 含量及化学计量特征进行了研究（温晨等，2021），在此基础上，本文通过对其土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）、全钾（TK）含量及化学计量比进行分层研究，试图明晰：（1）不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量比的垂直变化特征；（2）不同植物群落土壤养分含量及计量比间的耦合关系。旨在加深对黄土高原植被恢复过程中土壤养分循环了解，为黄土高原植被恢复类型及植被种类选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原西部定西市巉口镇龙滩流域（104°27′—104°31′ E、35°43′—35°46′ N），属于典型半干旱黄土丘陵沟壑区，年平均温度为 6.8 ℃，年平均降水量约为 386 mm，降雨主要集中在 7 月到 9 月，为暖温带半干旱气候（于洋等，2016）。本研究区土壤以黄绵土为主，含沙量高、有机质含量低、土质疏松（王鑫等，2019）。植被类型为暖温带半干旱草原，流域内的草地以长芒草（*Stipa bungeana*）天然群落、苜蓿（*Medicago sativa*）人工恢复群落和赖草（*Leymus secalinus*）自然恢复群落为主；灌丛以柠条（*Caragana korshinskii*）人工灌丛为主；森林以山杏（*Armeniaca sibirica*）和油松（*Pinus tabulaeformis*）人工林为主。

1.2 样地选择和野外调查

依据代表性和典型性原则，在研究区内选取长芒草、赖草、苜蓿、柠条及山杏 5 种典型植物群落共 31 个样地进行研究。每个样地随机设置 4 个标准样方，大小设置分别为森林 10 m×10 m，灌丛 5 m×5 m，草原 1 m×1 m，在样方内进行物种调查，同时采用手持 GPS 和地质罗盘记录每个样地的海拔、坡向、坡度等信息。样地基本特征见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sampling sites

群落 Community	样本数 Sample number	恢复年限 Restoration age (a)	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect (°)	土壤容重 Bulk density (g cm^{-3})	粘粒 Clay (%)	粉粒 Silt (%)	砂粒 Sank (%)
长芒草 *Stipa bungeana*	9	—	2 049±8	20±3	247±36	1.13±0.01	5.07±0.11	72.13±2.88	19.28±0.84
赖草 *Leymus secalinus*	9	≈15	2 098±24	12±3	224±33	1.18±0.02	4.85±0.20	74.34±0.62	19.83±0.85
苜蓿 *Medicago sativa*	6	＞15	2 027±19	14±4	183±58	1.19±0.02	5.34±0.15	74.38±1.27	20.27±1.31
柠条 *Caragana korshinskii*	4	＞15	2 088±17	29±3	80±4	1.13±0.02	5.04±0.06	75.49±1.13	19.47±1.09
山杏 *Armeniaca sibirica*	3	＞15	2 073±44	21±3	236±42	1.24±0.02	4.93±0.07	72.64±0.32	22.43±0.27

注：坡向计量标准是以正北方向为起点，按顺时针方向计量。

Note: The measurement standard of slope aspect is clockwise with due north as the starting point.

1.3 样品采集和测定

土壤样品于 2017 年 8 月采集。在每个固定样地内采用直径为 8 cm 的土钻，分别采集 0～20 cm、20～40 cm 和 40～60 cm 层的土壤样品，同一样地同一土层的 4 个土样混匀为 1 个混合样，剔除植物，碎石等杂物，采用四分法取大约 1 kg 的混合样，经过风干、研磨后，过 0.15 mm 筛后装入自封袋带回实验室进行土壤指标测试。土壤指标测定方法为土壤 SOC 含量采用重铬酸钾外加热法、TN 含量采用凯氏定氮法、TP 含量采用钼锑抗比色法、TK 含量采用火焰光度法(史瑞和等，1998)，各分析项目重复 3 次。

1.4 数据分析

通过冗余分析法研究地形因子对土壤生态化学计量垂直变化特征的影响（表 2），为避免冗余变量影响，分析前采用前向选择法 (forward selection) 选一组代理变量 (proxy variable) 进行分析，同时采用 Monte Carlo 检验代理变量与土壤生态化学计量特征是否存在显著相关性，排除其对土壤生态化学计量特征变化的干扰，只考虑土层深度和植物群落对土壤养分及生态化学计量比垂直变化的影响。采用单因素方差分析法（one-way ANOVA）对不同植物群落土壤各层的 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量特征进行分析，在检验方差齐性时，若方差齐，则采用新复极差法（Duncan）进行多重比较；若方差不齐，则采用 Tamhane's T2 法进行多重比较。同时采用双因素方差分析法（two-way ANOVA）对植物群落和土层深度对 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量特征的影响进行分析。通过线性回归方法分析不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量比间的关系。数据统计分析及作图分别在软件 SPSS 17.0 与软件 SigmaPlot 10.0 中进行。前向选择、Monte Carlo 检验和 RDA 分析均在软件 Canoco 5.0 中进行。

表 2 地形因子对土壤化学计量特征影响的 RDA 分析

Table 2 RDA analysis of the influence of topographic factors on soil stoichiometric characteristics

环境因子 Environmental factor	因子解释率 Explanation rate (%)	*F*	*P*
海拔Altitude	7.6	2.4	0.092
坡度Aspect	2.5	0.8	0.458
坡位Position	2.1	0.7	0.538
坡向Aspect	1.7	0.5	0.700

2 结果与分析

2.1 不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量垂直分布特征

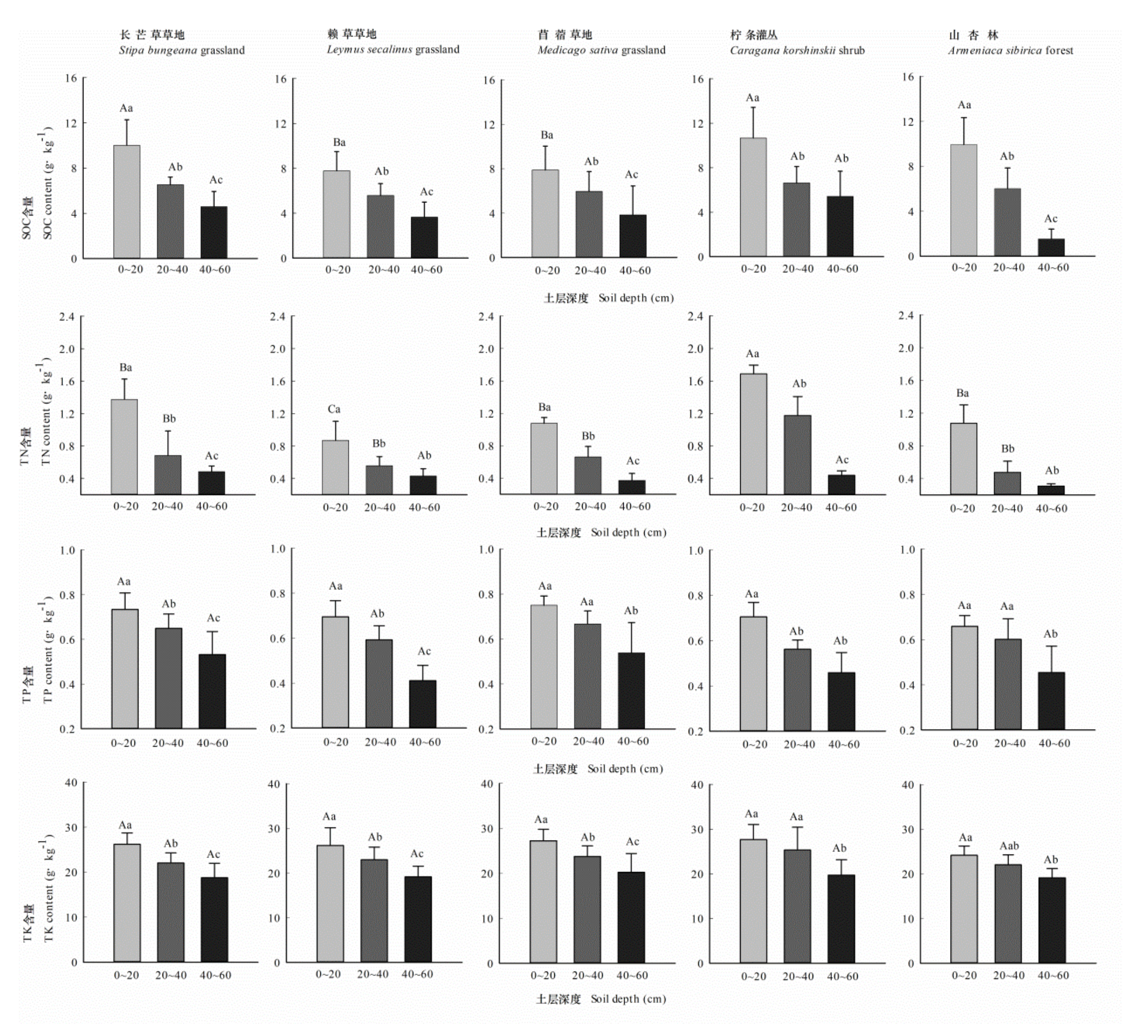
通过双因素方差分析可得，同一土层中，植物群落对土壤 SOC、TN、TP 含量具显著影响（$P<0.05$），而对土壤 TK 含量无显著影响（$P>0.05$）。同一植物群落，土层深度对土壤 SOC、TN、TP、TK 含量均具显著影响（$P<0.05$）。当土层深度与植物群落交互作用时，只对土壤 TN 含量具显著影响（$P<0.05$）（表 3）。在土壤垂直剖面上，SOC、TN、TP、TK 含量均随土层加深而逐渐降低，且 0～20 cm 土层 SOC、TN、TP、TK 含量均显著高于其余两个土层。

不同植物群落 SOC、TN、TP、TK 含量在各土层间存在差异（图 1）。在 0～20 cm 土层中，赖草草地和苜蓿草地土壤 SOC 含量显著低于其他植物群落，而在 20～40 cm 和 40～60 cm 两个土层中，SOC 含量在不同群落间无显著差异（$P>0.05$）。TN 含量在 0～20 cm 和 20～40 cm 两个土层中均表现为柠条群落显著高于其他群落，而在 40～60 cm 土层中，各群落土壤 TN 含量无显著差异（$P>0.05$）。从恢复方式来看，人工恢复群落土壤表层 SOC、TN 含量均高于自然恢复群落，土壤 TP、TK 含量在不同植被恢复方式下的 3 个土层中均无显著差异（$P>0.05$）。

表 3 植物群落和土层深度对土壤 SOC、TN、TP、TK 含量的影响

Table 3 Effects of vegetation types and soil depths on soil SOC, TN, TP and TK contents

自变量 Variable	因变量 Dependent variable	*F*	*P*
群落 Community	SOC	3.925	0.006
	TN	22.239	0.000
	TP	4.108	0.005
	TK	1.458	0.223
土层深度 Soil depth	SOC	57.182	0.000
	TN	156.307	0.000
	TP	51.932	0.000
	TK	32.874	0.000
群落×土层深度 Community × Soil depth	SOC	1.095	0.376
	TN	5.569	0.000
	TP	0.186	0.992
	TK	0.216	0.987



图中数据为平均值±标准差；不同大写字母表示同一土层不同群落间差异显著（*P*<0.05）；不同小写字母表示同一群落不同土层间差异显著（*P*<0.05）。下同。

The data in the figure is the mean ±standard deviation; Different capital letters indicate significant differences between different communities in the same soil layer（*P*<0.05）; Different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers in the same community（*P*<0.05）. The same below.

图 1 不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution characteristics of soil SOC, TN, TP and TK contents in different communities

2.2 不同植物群落土壤化学计量比的垂直分布特征

同一土层中，植物群落对土壤 C:N、C:P、C:K、N:P 和 N:K 均具显著影响（*P*<0.05），对土壤 P:K 则无显著性影响（*P*>0.05）。同一植物群落，土层深度对土壤 C:P、C:K、N:P 和 N:K 具显著影响（*P*<0.05），对土壤 C:N、P:K 则无显著影响（*P*>0.05）。在土层深度与植物群落交互作用下，只对土壤 N:P、N:K 具显著影响（*P*<0.05）（表 4）。在土壤垂直剖面上，除 C:N 随土层加深而增加，其他土壤化学计量比均随土层加深而逐渐降低。其中，土壤 C:N、P:K 在 3 个土层中无显著差异（*P*>0.05），而 0～20 cm 的土层中土壤 C:K、N:P、N:K 均显著最高。

不同植物群落土壤化学计量比存在差异（图 2）。在 0～20 cm 和 20～40 cm 的土层中，赖草群落 C:N 显著最高，柠条灌丛显著最低，在 40～60 cm 的土层中各植物群落 C:N 无显著差异（*P*>0.05）。土壤 C:P 在 3 个土层中差异显著（*P*<0.05），表现为柠条灌丛>山杏林>长芒草草地>苜蓿草地>赖草草地。不同群落土壤 C:K 在 0～20 cm 和 20～40 cm 的土层中无显著差异（*P*>0.05），在 40～60 cm 的土层中，山杏群落 C:K 显著低于其他群落。土壤 N:P、N:K 在 0～20 cm 和 20～40 cm 的土层中表现为柠条群落显著高于其他群落，在 40～60 cm 的土层中各植物群落 N:P、N:K 无显著差异（*P*>0.05）。3 个土层下土壤 P:K 在不同群落间

无显著差异（*P*>0.05）。从恢复方式来看，自然恢复群落 0～20 cm 和 20～40 cm 土层 C:N 显著高于天然荒草与人工恢复群落（*P*<0.05）。天然荒草群落 0～20 cm 土层 C:P、C:K、N:P、N:K 均高于自然恢复群落。土壤 P:K 在不同恢复方式下的 3 个土层中均无显著差异（*P*>0.05）。

表 4 植物群落和土层深度对土壤化学计量比的影响

Table 4 Effects of vegetation types and soil depths on stoichiometry ratios

自变量 Variable	因变量 Dependent variable	*F*	*P*
群落 Community	C:N	8.530	0.049
	C:P	4.730	0.002
	C:K	2.972	0.024
	N:P	22.642	0.000
	N:K	15.298	0.000
	P:K	1.779	0.141
土层深度 Soil depth	C:N	1.495	0.920
	C:P	16.156	0.000
	C:K	23.860	0.000
	N:P	57.816	0.000
	N:K	71.769	0.000
	P:K	0.284	0.753
群落×土层深度 Community × Soil depth	C:N	1.885	0.920
	C:P	1.168	0.329
	C:K	1.178	0.323
	N:P	5.670	0.000
	N:K	3.396	0.002
	P:K	0.197	0.990

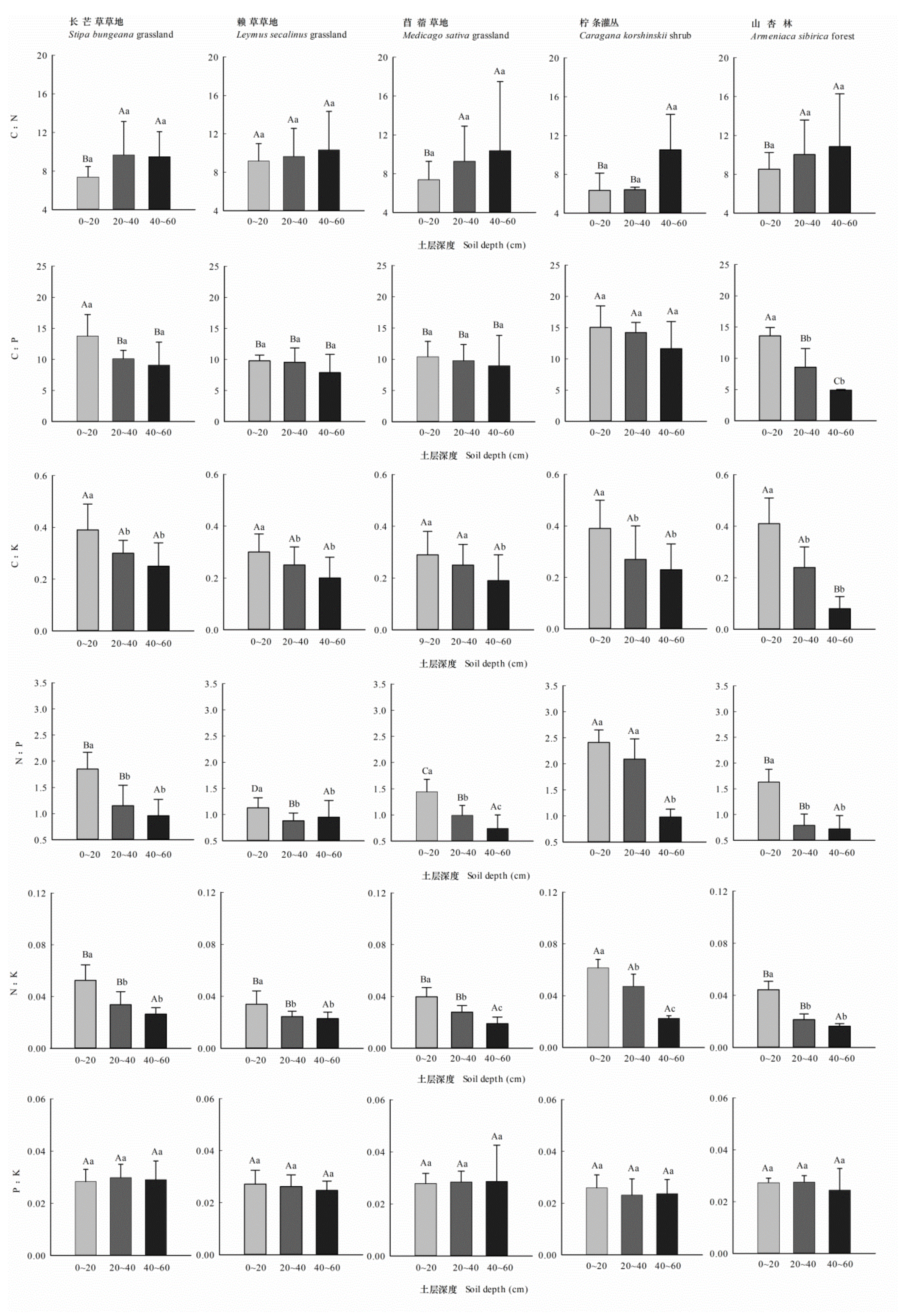


图 2 不同植物群落土壤化学计量比垂直分布特征

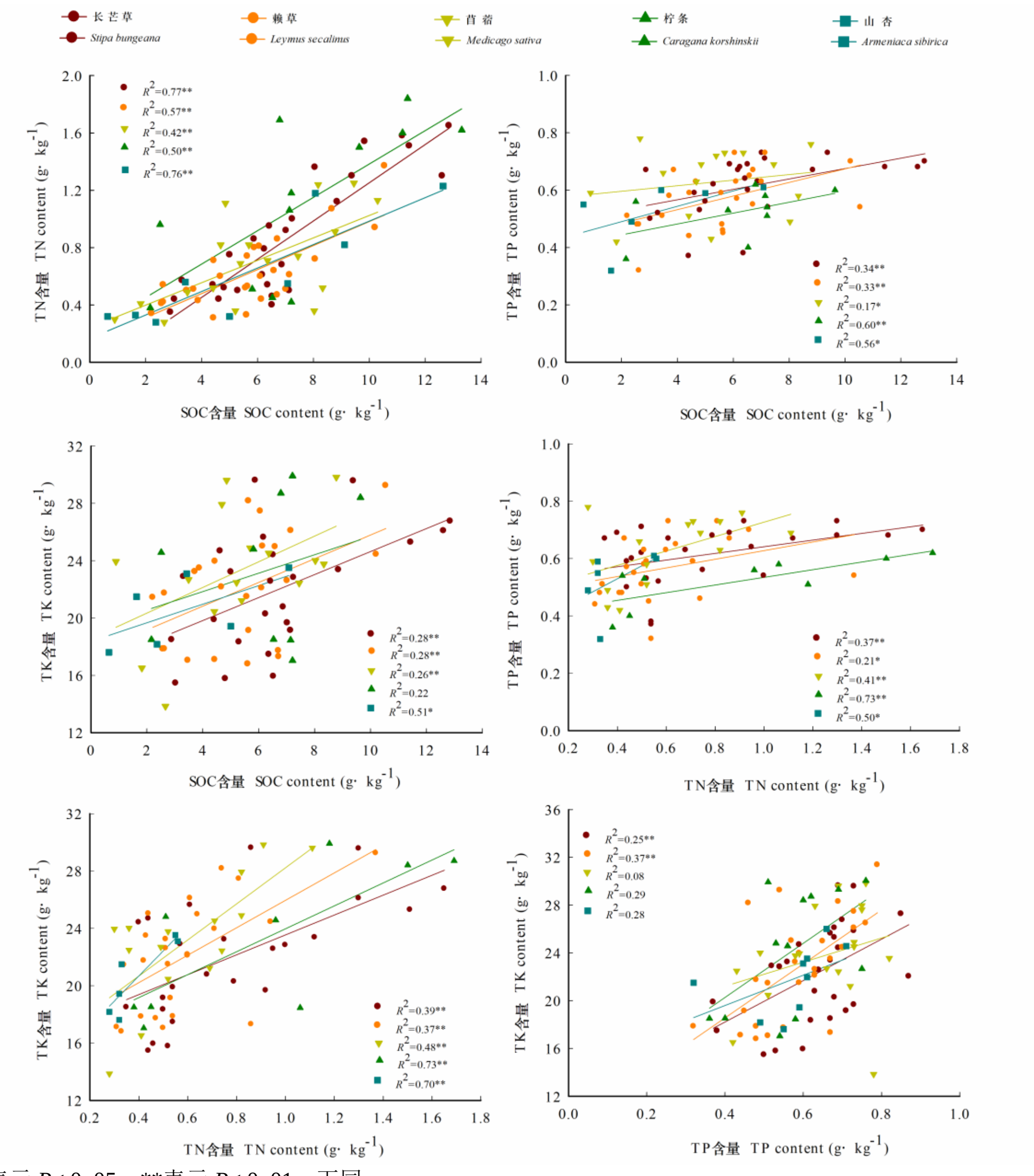
Fig. 2 Vertical distribution characteristics of soil stoichiometry ratio in different communities

2.3 不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量比的相关性

不同植物群落间，土壤 SOC、TN、TP、TK 含量在彼此间具正相关关系（图 3）。其中，土壤 SOC 含量与 TN 含量、TN 含量与 TP 含量、SOC 含量与 TP 含量、TN 含量与 TK 含量

间均达到显著正相关（*P*<0.05）。除人工恢复柠条群落外，其他群落土壤中 SOC 含量与 TK 含量均达到显著正相关（*P*<0.05）。长芒草群落、赖草群落土壤 TP 含量与 TK 含量具显著正相关（*P*<0.05），而在人工恢复方式下，苜蓿、柠条和山杏群落土壤 TP 含量与 TK 含量未达到显著正相关（*P*>0.05）。

通过线性回归分析发现，不同植物群落土壤生态化学计量比间相关关系存在差异（图 4）。各群落土壤 C:N 与 N:P、C:N 与 N:K、P:K 与 C:P、P:K 与 N:P 间均呈负相关关系，其中长芒草群落土壤 C:N 与 N:P、C:N 与 N:P 间的线性关系达到显著水平。土壤 C:P 与 N:P、C:P 与 N:K、C:N 与 C:P、C:K 与 P:K 间具正相关关系，其中长芒草群落、赖草群落和山杏群落土壤 C:P 与 N:P、C:P 与 N:K 间的线性关系达到显著水平。各群落土壤 C:P 与 C:K、C:K 与 N:K、N:P 与 N:K 间均具显著正相关关系（*P*<0.05），土壤 C:P、N:P、N:K 均随土壤 C:K 的增加呈线性增加趋势。



*表示 *P*< 0. 05；**表示 *P*< 0. 01。下同。

*indicates *P*<0.05; ** indicates *P*<0.01. The same below.

图 3 不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量间的相关性

Fig. 3 Correlations of soil SOC, TN, TP and TK contents in different communities

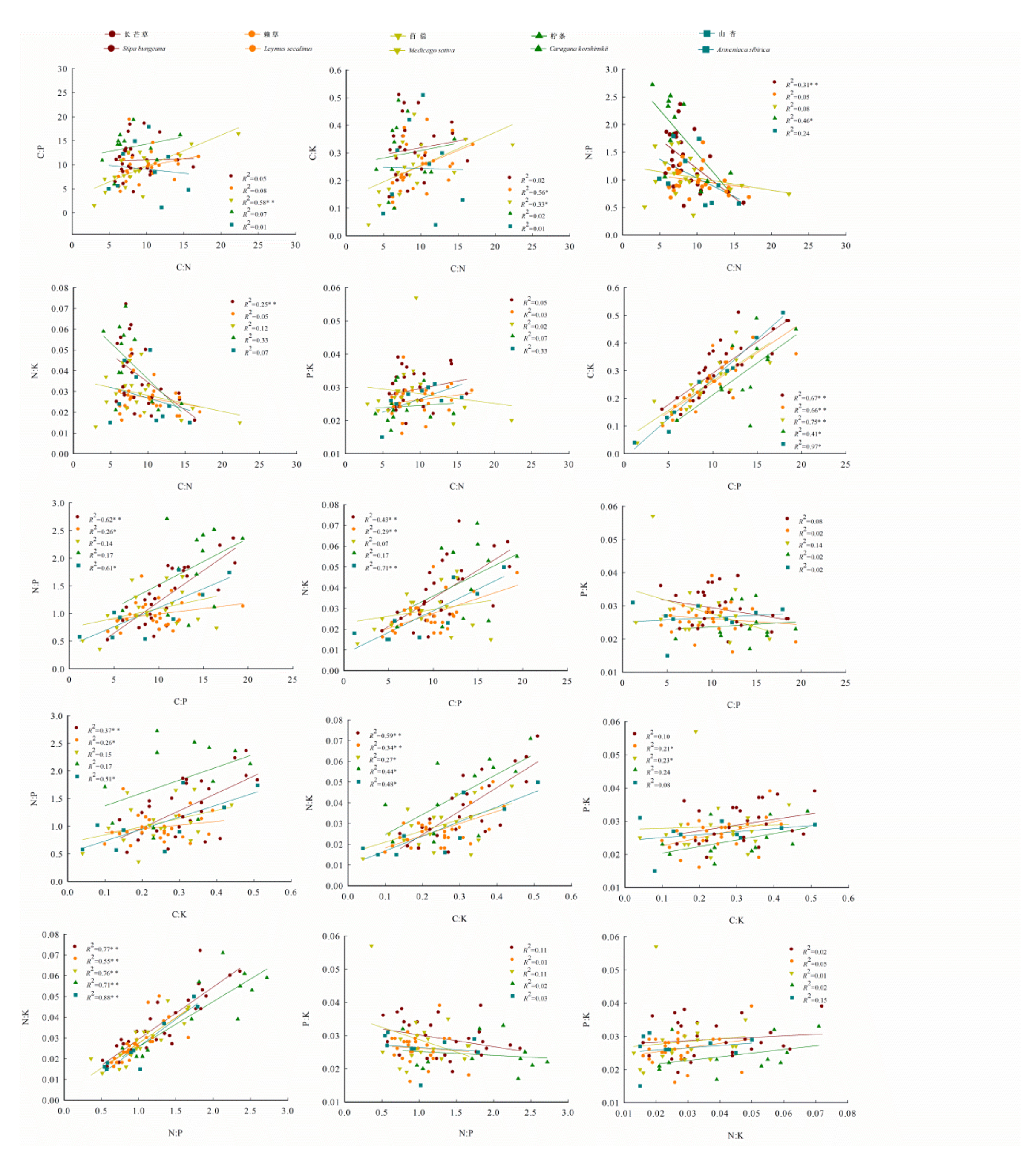


图 4 不同植物群落土壤化学计量比间的相关性

Fig. 4 Correlations of soil stoichiometry ratio in different communities

3 讨论

3.1 植物群落对土壤 SOC、TN、TP、TK 含量垂直分布的影响

本研究中，0～20 cm 土层的土壤 SOC、TN、TP、TK 含量均显著高于其他土层（P<0.05），有明显表聚现象，这与前人研究结果一致（陶冶等，2016；吴鹏等，2019），这可能是由于表层土壤主要受外界环境和枯落物养分归还的影响，使得养分首先聚集在表层土壤，然后再随水或其他介质往下层迁移（刘兴诏等，2010）。赖草和苜蓿群落 0～20 cm 层的土壤 SOC 含量显著低于柠条、山杏及长芒草群落，这与山杏、柠条作为乔灌木其土壤表层具有较高凋落物积累量，土壤容重小，表层通气性较好，微生物分解速率高，根系生物量丰富能够分泌较高养分有关（尹秋龙等，2017）。苜蓿具有高耗水的特性，随着种植年限的增加，草地会

逐渐退化，经历苜蓿群落、苜蓿+赖草群落、赖草群落和长芒草群落的自然演替过程（郭茹茹等，2020）。长芒草作为该研究区的天然植被，经历长期的演替过程，群落结构复杂，物种多样性增加，林下枯落物层增厚，同时其须根系能够改善土壤物理性质，提高团聚体含量，增强土壤抗蚀性，减少水土流失，进而有利于养分积累，相反赖草为自然恢复群落，植被稀疏，养分富集作用较弱，易发生水土流失，归还给土壤的枯落物和营养物质较少，根系的死亡腐解更少，因而表层 SOC 较低。在 0～20 cm 和 20～40 cm 的土层中，柠条群落 TN 含量均显著高于其他植物群落（P<0.05），这与尹秋龙等（2017）对黄土高原植物群落土壤养分特征研究结果一致。这一方面与柠条作为固氮植物能够固定较多的氮有关，另一方面柠条群落为人工恢复，物种多样性高，凋落物种类丰富，归还量较高，能够积累更多养分。此外，有研究表明柠条根系可分泌能够活化根际土壤难溶性养分的有机酸，提高土壤养分有效性从而改善土壤养分质量（安韶山和黄懿梅，2006）。从整体来看，人工恢复苜蓿、柠条、山杏群落土壤表层 SOC、TN 含量均高于自然恢复赖草群落，这可能是由于人工植被恢复样地植被盖度和生物量迅速增加，有机质累积速度快，对土壤的改善较为明显（杜华栋等，2021）。此外，土壤 SOC、TN 含量垂直变化较大，变异性较高，这与土壤 SOC、TN 含量主要来源于凋落物的分解、植物根系分泌及微生物活动等有关（Deng et al., 2016），土壤 TP、TK 含量在不同植物群落和恢复方式下均无显著差异，主要是因为其受植物和恢复方式影响较小，主要来源于岩石风化与淋溶作用，岩石风化需要较长时间，在 0～60 cm 土层风化程度差异不大，进而导致其垂直变化较小变异性较弱（李占斌等，2017）。

3.2 植物群落对土壤化学计量比垂直分布的影响

土壤 SOC、TN、TP、TK 化学计量特征是反映土壤养分质量的重要指标（Liu et al., 2017）。在土壤垂直剖面上，各植物群落土壤 C:N 随土层加深而增加，但在各土层间无显著差异。差异不显著的原因可能是（1）有机物质的形成需要一定数量的 N 和其他营养成分与其相对应的相对固定比率的 C (Sterner & Elser, 2002)；（2）SOC、TN 元素作为土壤结构性元素，来源基本相同，受植物群落和恢复方式影响较小，在积累与消耗过程中 C:N 的变化总是保持相对稳定（Cleveland & Liptzin, 2007）。土壤 C:N 是反映土壤有机质分解速率与养分供给的重要指标（Li et al., 2015）。人工恢复柠条群落土壤 C:N 最低，自然恢复赖草群落土壤 C:N 最高，说明该研究区内柠条有机质分解速率相对较高，更有利于养分的积累。在 0～20 cm 土层各植物群落土壤 C:P 表现为柠条>长芒草>山杏>苜蓿>赖草，这可能是因为 C:P 与土壤 P 的有效性成反比，主要是由土壤 C 含量决定（陶冶等，2016），柠条群落在 5 种植物群落中该层 SOC 含量最高，因此土壤 C:P 最大，土壤 C:P 是衡量微生物矿化土壤有机物质吸收固持磷或释放磷素潜力的一个指标（廖珂等，2020），同时也表明自然恢复赖草群落土壤 P 的有效性较高，释放潜力大。此外，在 0～20 cm 和 20～40 cm 土层中 N:K 表现为人工恢复柠条显著高于其他植物群落，而在 40～60 cm 土层中则表现为山杏土壤 C:K 显著小于其他植物群落（P<0.05），其主要原因为 TN、SOC 元素在各植物群落间差异较大，而 TK 元素则保持相对稳定，导致其 N:K、C:K 的变化主要受 SOC、TN 元素的影响，柠条在 0～20 cm 和 20～40 cm 土层中 TN 含量最高，因而 N:K 最高，相反山杏作为乔木林，主要靠吸收土壤中的大量养分来维持自身发育，对土壤质量的改善有限，在 40～60 cm 土层 SOC 含量最低，因此 C:K 低于其他群落。在 3 个垂直土层中，土壤 P:K 差异均不显著，这说明土壤 P:K 相对于其他化学计量比对植物群落和恢复方式的响应最不敏感。N、P 元素是植物生长的主要限制元素，因此，N:P 也可作为判断土壤养分受限情况的重要指标。研究区内 0～60 cm 土层 N:P 的变化范围为 0.72～2.41，明显低于其他研究结果（Wang et al., 2018；吴鹏等，2019），但与孙骞等（2020）研究结果相接近，进一步说明黄土高原 N 素的缺乏。

3.3 植物群落对土壤 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量比相关性的影响

通过对不同植物群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量间的关系进行回归分析发现，各群落土壤 SOC、TN、TP 含量在彼此间具显著正相关关系（P<0.05），与 Tian 等（2010）和李红林等（2015）的研究结果一致，表明黄土小流域植被恢复过程中土壤 SOC、TN、TP 含量变化具一定耦合性。本研究发现土壤 SOC、TN、TP 含量与 TK 含量也具正相关关系，但人工恢复方式下苜蓿、柠条、山杏群落土壤 TP 与 TK 间未达到显著性，这与秦娟等（2016）的研究结果相似，与庞圣江等（2015）的研究结果有差异。随着植被恢复时间的不断推移，土壤 SOC、TN、TP 含量变化具高度一致的同时可能在一定程度上伴随 TK 含量的变化，目

前关于土壤 TK 含量研究较少，本研究也仅考虑不同恢复方式下植物群落与土层深度对 TK 含量变化的影响，后期应进一步结合恢复时间或地形等因子对 TK 含量变化及与其他元素之间的耦合关系做进一步研究。本研究发现不同植物群落土壤化学计量比的关系存在差异，其中长芒草、赖草、山杏群落土壤 C:P 与 N:P、C:P 与 N:K 间具显著正相关关系（P<0.05），而苜蓿和柠条群落土壤则未达到显著水平。这主要受各群落独特的生理机制影响，不同植物群落对大气、土壤养分的吸收和释放有所差异（董雪等，2019），影响其化学计量比的变化进而影响化学计量比间的关系。本研究发现 5 种植物群落土壤 C:N 与 N:P、C:N 与 N:K 间具负相关关系，C:K 与 N:K、N:K 与 N:P 间具正相关关系，表明研究区内土壤化学计量比的变化主要受 C、N 元素的调控。

4 结论

（1）不同群落土壤 SOC、TN、TP、TK 含量均随土层加深而逐渐降低。苜蓿草地、柠条灌丛、山杏林土壤表层 SOC、TN 积累量均高于赖草草地，表明该研究区人工恢复植被更有利于土壤养分的提高。

（2）柠条土壤 C:N 在 5 种植物群落中最低，表明有机质分解速率相对较高，更有利于养分积累，赖草土壤 C:P 显著低于其他植物群落（P<0.05），说明赖草 TP 的有效性较高，释放潜力大，而其他群落土壤 TP 相对缺乏。

（3）土壤 SOC、TN、TP、TK 含量彼此间具相关关系，表明黄土小流域内土壤养分变化具一定耦合性。各植物群落土壤 C:N 与 N:P、C:N 与 N:K 间均呈显著负相关（P<0.05），N:K 与 N:P 间均呈显著正相关（P<0.05），表明 C、N 元素是该研究区调控土壤化学计量比变化的主要因素。

（4）总体来看，目前该研究区内人工恢复群落柠条对土壤 C、N、P 元素的积累效果更好，生态化学计量特征综合更强，适应于在该地区种植来提高土壤质量、促进土壤养分循环。考虑到该地区的水分等条件，退耕还草还林时应优先考虑恢复草本和灌木等先锋植被，等土壤质量得到一定程度的改善时，再对灌木进行平茬、疏伐等管理，增加物种多样性，缓解土壤水分匮缺。

参考文献：

AN SS, DARBOUX F, CHENG M, 2013. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China)[J]. Geoderma, 209: 75-85.

AN SS, HUANG YM, 2016. Study on the ameliorate benefits of *Caragana korshinskii* shrubwood to soil properties in Loess Hilly Area[J]. Sci Silv Sin, 42(1): 70-74. [安韶山，黄懿梅，2016. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J]. 林业科学，42(1)：70-74.]

AN SS, HUANG YM, ZHENG FL, 2008. The changes of soil quality as affected by different land use in plant communities of Southern Ningxia loess hilly region[J]. Plant Nutr Fert Sci, 14(2): 300-307.[安韶山，黄懿梅，郑粉莉，2008. 宁夏黄土区不同植物群落土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，14(2)：300-307.]

CHEN HS, ZHANG W, WANG K L, et al., 2012. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China[J]. J Sci Food Agric, 92(5): 1086-1093.

CHEN XJ, HOU FJ, MATTHEW C, et al., 2017. Soil C, N, and P stocks evaluation under major land uses on China’s Loess Plateau[J]. Rangel Ecol Manag, 70(3): 341-347.

CLEVELAND CC, LIPTZIN D, 2007. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield Ratio” for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 85(3): 235-252.

DENG J, SUN PS, ZHAO FZ, et al., 2016. Soil C, N, P and Its stratification ratio affected by artificial vegetation in subsoil, Loess Plateau China[J]. PLoS ONE, 11(3): e0151446.

DENG XJ, CAO JZ, SONG XC, et al., 2014. Vertical distribution characteristics of three forest types'soil properties on Mao'er Mountain Biosphere Reserve[J]. Ecol Sci, 33(6): 1129-1134.[邓小军，曹继钊，宋贤冲，等，2014. 猫儿山自然保护区 3 种森林类型土壤养分垂直分布特征[J]. 生态科学，33(6)：1129-1134.]

DONG X, XIN ZM, HUANG YR, et al., 2019. Soil stoichiometry in typical shrub communities in the Ulan Buh desert[J]. Acta Ecol Sin, 39(17): 6247-6256. [董雪，辛智鸣，黄雅茹，等，2019. 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J]. 生态学报，39(17)：6247-6256.]

DU HD, CAO YC, NIE WJ, et al., 2021. Evolution of soil properties under artificial and natural revegetation in loess gully coal mining subsidence area[J]. J Chin Coal Soc, 46(5): 1641-1649.[杜华栋，曹祎晨，聂文杰，等，2021. 黄土沟壑区采煤塌陷地人工与自然植被恢复下土壤性质演变特征[J]. 煤炭学报，46(5)：1641-1649.]

ELSER JJ, STERNER RW, GOROKHOVA E, et al., 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecol Lett, 3(6): 540-550.

FANG Y, AN SS, MA RT, 2017. Ecological stoichiometric characteristics of plants and soil in grassland under different restoration types in Yunwu Mountain, China[J]. J Appl Ecol, 28(1): 80-88.

GRIFFITHS BS, SPILLES A, BONKOWSKI M, 2012. C:N:P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess[J]. Ecol Proc, 1(1): 1-11.

GUO RR, YANG L, LI ZS, et al., 2020. Trade-offs among ecological functions during alfalfa grassland restoration in a semi-arid region of the Loess Plateau[J]. Pratacul Sci, 37(9): 1698-1709.[郭茹茹，杨磊，李宗善，等，2020. 黄土高原半干旱区苜蓿草地撂荒过程生态功能的权衡分析[J]. 草业科学，37(9)：1698-1709.]

HE JS, HAN XG, 2010. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Acta Plant Ecol, 34(1): 2-6. [贺金生，韩兴国，2010. 生态化学计量学：探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报，34(1)：2-6.]

LI HL, GONG L, ZHU ML, et al., 2015. Stoichiometry characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim basin, China[J]. Acta Pedol Sin, 52(6): 1345-1355. [李红林，贡璐，朱美玲，等，2015. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报，52(6)：1345-1355.]

LI PX, CHU BY, TENG Z, et al., 2020. Effect of vegetation type on the eco-stoichiometric characteristics of soils from around Chaohu Lake[J]. Pratacul Sci, 37(8): 1448-1457. [李培玺，储炳银，滕臻，等，2020. 巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 草业科学，37(8)：1448-1457.]

LI YQ, ZHAO XY, ZHANG FX, et al., 2015. Accumulation of soil organic carbon during natural restoration of desertified grassland in China's Horqin Sandy Land[J]. J Arid Land, 7(3): 328-340.

LI ZB, ZHOU B, MA TT, et al., 2017. Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in Loess Hilly Region, China[J]. J Soil Water Conserv, 31(6): 312-318. [李占斌，周波，马田田，等，2017. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报，31(6)：312-318.]

LIAO K, SHEN FF, LIU WF, et al., 2020. C, N and P stoichiometric characteristics of litterfall and soil in a Chinese fir plantation under long-term nitrogen deposition[J]. Guihaia,

40(11):1551-1562.[廖珂，沈芳芳，刘文飞，等，2020. 长期氮沉降下杉木人工林凋落物与土壤的 C、N、P 化学计量特征[J]. 广西植物，40(11)：1551-1562.]

LIU X, MA J, MA ZW, et al., 2017. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. Catena, 150: 146-153.

LIU XZ, ZHOU GY, ZHANG DQ, et al., 2010. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Acta Plant Ecol, 34(1):64-71. [刘兴诏，周国逸，张德强，等，2010. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N，P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报，34(1)：64-71.]

PANG SJ, ZHANG P, JIA HY, et al., 2015. Research on soil ecological stoichiometry under different forest types in Northwest Guangxi[J]. Chin Agric Sci Bull, 31(1): 17-23. [庞圣江，张培，贾宏炎，等，2015. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征[J]. 中国农学通报，31(1)：17-23.]

QIN J, KONG HY, LIU H, 2016. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests[J]. J NW A & F (Nat Sci Ed), 44(2): 68-76. [秦娟，孔海燕，刘华，2016. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，44(2)：68-76.]

SARDANS J, PENUELAS J, 2014. Climate and taxonomy underlie different elemental concentrations and stoichiometries of forest species: the optimum “biogeochemical niche”[J]. Plant Ecol, 215(4): 441-455.

SHI RH, BAO SD, QIN HY, 1998. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press. [史瑞和，鲍士旦，秦怀英，1998. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社.]

STERNER RW, ELSER JJ, 2002. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press.

SUN Q, WANG B, ZHOU HP, et al., 2020. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small catchment of loess hilly area[J]. Chin J Ecol, 39(3): 766-774. [孙骞，王兵，周怀平，等，2020. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J]. 生态学杂志，39(3)：766-774.]

TAO Y, ZHANG YM, ZHOU XB, 2016. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China[J]. Chin J Appl Ecol, 27(7): 2239-2248. [陶冶，张元明，周晓兵，2016. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报，27(7)：2239-2248.]

TIAN HQ, CHEN GS, ZHANG C, et al., 2010. Pattern and variation of C:N:P ratios in China’s soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 98(1): 139-151.

WANG GL, LIU GB, 2002. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of Loess Hilly Region[J]. Bull Soil Water Conserv, 22(1): 1-5.[王国梁，刘国彬，2002. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报，22(1)：1-5.]

WANG KB, SHI WY, SHANGGUAN ZP, 2012. Effects of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 28(15): 80-86.[王凯博，时伟宇，上官周平，2012. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报，28(15)：80-86.]

WANG MM, CHEN HS, ZHANG W, et al., 2018. Soil nutrients and stoichiometric ratios as

affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China[J]. Sci Total Environ, 619: 1299-1307.

WANG W, SARDANS J, ZENG CS, et al., 2014. Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in a subtropical tidal wetland[J]. Geoderma, 232: 459-470.

WANG X, YANG L, ZHAO Q, et al., 2019. Spatial heterogeneity and environmental drivers of grassland community functional traits in the semi-arid loess small watershed[J]. Pratacul Sci, 36(9): 2201-2211. [王鑫，杨磊，赵倩，等，2019. 半干旱黄土小流域草地群落功能性状空间异质性及环境驱动[J]. 草业科学，36(9)：2201-2211.]

WEI Z, JING QW, XIN GD, et al., 2018. Relationship between soil nutrient properties and biological activities along a restoration chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantation forests in the Ziwuling Mountains, China[J]. Catena, 161: 85-95.

WEN C, YANG ZJ, YANG L, et al., 2021. Ecological stoichiometry characteristics of plants and soil under different vegetation types in the semi-arid loess small watershed[J]. Acta Ecol Sin, 41(5): 1824-1834. [温晨，杨智姣，杨磊，等，2021. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报，41(5)：1824-1834.]

WU P, CUI YC, ZHAO WJ, et al., 2019. Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of Maolan karst forest vegetation, southwestern China[J]. J Beijing For Univ, 41(3): 80-92. [吴鹏，崔迎春，赵文君，等，2019. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报，41(3)：80-92.]

XIN ZB, RAN LS, LU XX, 2012. Soil erosion control and sediment load reduction in the Loess Plateau: Policy Perspectives[J]. Int J Water Resour Dev, 28(2): 325-341.

XU L, XING XY, CUI HB, et al., 2020. Soil biological characteristic, nutrient contents and stoichiometry as affected by different types of remediation in a smelter-impacted soil[J]. Chem Ecol, 36(2): 1-15.

XUE S, LIU GB, DAI QH, et al., 2007. Effect of different vegetation restoration models on soil microbial biomass in eroded Hilly Loess Plateau[J]. J Nat Resour, 22(1): 20-27.[薛萐，刘国彬，戴全厚，等，2007. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J]. 自然资源学报，22(1)：20-27.]

YAN YH, CAO W, 2010. The responses of soil nutrients to different restoration approaches[J]. Res Soil Water Conserv, 17(5): 51-53. [闫玉厚，曹炜，2010. 黄土丘陵区土壤养分对不同植被恢复方式的响应[J]. 水土保持研究，17(5)：51-53.]

YIN QL, KOU M, JIAO JY, et al., 2017. Characteristics of soil nutrients and stoichiometry in different communities in Hilly gullied region of Loess Plateau[J]. Bull Soil Water Conserv, 37(1): 62-66. [尹秋龙，寇萌，焦菊英，等，2017. 黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征[J]. 水土保持通报，37(1)：62-66.]

YU Y, WEI W, CHEN LD, et al., 2016. Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid loess hilly region[J]. Acta Ecol Sin, 36(11): 3441-3449. [于洋，卫伟，陈利顶，等，2016. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. 生态学报，36(11)：3441-3449.]

ZENG QC, LAL R, CHEN YA, et al., 2017. Soil, leaf and root ecological stoichiometry of *Caragana korshinskii* on the Loess Plateau of China in relation to plantation age[J]. PLoS ONE, 12(1): e0168890.

ZHAO Y, ZHANG W, HU PL, et al., 2021. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical karst depression[J]. Acta Ecol Sin, 41(21) : 8535-8544.[赵元，张伟，胡培雷，等，2021. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征[J]. 生态学报，41(21)：8535-8544.]

ZHOU P, LIU GB, HOU XL, 2008. Study on fractal features of soil microaggregates during different restoration stages in the Loess hilly region[J]. Acta Agr Sin, 16(4): 396-402.[周萍，刘国彬，侯喜禄，2008．黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征[J]. 草地学报，16(4)：396-402.]

ZHU GY, DENG L, SHANGGUAN ZP, 2018. Effects of soil aggregate stability on soil N following land use changes under erodible environment[J]. Agric Ecosyst Environ, 262: 18-28.

ZHU QL, XING XY, ZHANG H, et al., 2013. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region[J]. Acta Ecol Sin, 33(15): 4674-4682.[朱秋莲，邢肖毅，张宏，等，2013. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]．生态学报，33(15)：4674-4682.]